

## Sistem Pemanen Energi dengan Transduser Piezoelektrik untuk Perangkat Daya Rendah

<sup>1</sup>Deddy Susilo, <sup>2</sup>Eka Firmansyah, dan <sup>3</sup>Litasari

<sup>1</sup>Fakultas Elektronika dan Komputer UKSW  
Jl. Diponegoro 52-60 Salatiga, Indonesia

<sup>2,3</sup>Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi UGM  
Jl. Grafika 2A Yogyakarta, Indonesia

E-mail: <sup>1</sup>deddy.susilo@gmail.com, <sup>2</sup>eka.firmansyah@gmail.com, <sup>3</sup>litasari@yahoo.com

### Abstrak

*Sistem pemanen energi dengan sumber vibrasi yang diuji secara empiris terdiri dari transduser piezoelektrik, diode penyearah dan penyimpan energi dengan super kapasitor. Studi empiris ini menghasilkan bahwa sistem penyearah yang tepat untuk mengambil energi skala ratusan miliVolt adalah diode schottky. Diode schottky mempunyai efisiensi 85% untuk sumber masukan di atas 1V. Waktu pengisian superkapasitor dengan sumber arus AC tidak terpengaruh frekuensi, tetapi dari besar amplitudonya. Efisiensi transduser piezoelektrik paling tinggi pada frekuensi 10kHz dan 133kHz yakni 3,6% dan 22%. Resistansi keluaran transduser menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi. Pada pengujian perangkat mikrokontroler, sensor suhu dan RF transceiver dengan frekuensi pengiriman data 1, 5 dan 10 Hz diperoleh data bahwa pada frekuensi 1 Hz membutuhkan energi paling kecil.*

**Kata kunci:** *energy harvesting, vibration, piezoelectric.*

### Abstract

*The energy harvester system from the vibrational energy that had been empirically tested, consist of a piezoelectric transducer, a diode rectifier and energy storage using a super capacitor. The result of this empirical study was the rectifier system appropriate to rectify the voltage to the level of hundreds of millivolts was schottky diode. This diode had an efficiency of 85% with input voltage source at above of 1V. The charging time of the super capacitor with AC current source was not affected by the frequency, but depended from the amplitude. The highest efficiency of the piezoelectric transducer at frequency 10kHz and 133kHz were 3.6% and 22%. The transducer output resistance decreases with increasing frequency. On testing with the microcontroller module, a temperature sensor and RF transceiver with a data transmission frequency at 1, 5 and 10 Hz, it was concluded that the frequency at 1 Hz requires the moreless energy.*

**Keywords:** *energy harvesting, vibration, piezoelectric.*

### 1. Pendahuluan

Studi empiris mengenai komponen penyusun sistem pemanen energi dengan sumber vibrasi dengan transduser piezoelektrik tipe PZT (*lead zirconate titanate*) atau sering dikenal buzzer piezo menggunakan komponen dasar elektronika seperti diode dan kapasitor. Penelitian ini menekankan bagaimana pemilihan komponen-komponen

yang tepat untuk mengambil dan menyimpan energi dari buzzer piezoelektrik. Sebagai contoh pengambilan energi dari trotoar pejalan kaki ataupun jalan raya, hasilnya akan disimpan pada media penyimpan energi dan digunakan untuk mendayai lampu jalan berbahan LED (*light emitting diode*) pada malam hari [1]. Sumber energi skala mikro yang ada di alam mempunyai kerapatan daya yang ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1:** Sumber Energi [2]

Metode Pengambilan Energi	Kerapatan Daya
Sel Surya	15mW/cm <sup>3</sup>
Magnetostatik	0,3 hingga 800μW
Vibrasi	116-200μW/cm <sup>3</sup>
Bising akustika	0,003-0,96μW/cm <sup>3</sup>
Frekuensi Radio	1μW/cm <sup>3</sup>
Piezoelektrik	330μW/cm <sup>3</sup>
Angin	1μW/cm <sup>3</sup>
Termoelektrik	40μW/cm <sup>3</sup>

Teknik pengambilan energi yang umum adalah dengan menggunakan *rectifier*, kapasitor dan baterai sebagai penyimpan. Teknik *Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor* memungkinkan potensi daya yang dapat dihasilkan sekitar 10 hingga 100 μW dari daya yang tersedia di lingkungan.

Sistem pemanen energinya adalah sebuah penyearah gelombang penuh dan sebuah perata tegangan yakni kapasitor dan penyimpan energi berupa baterai. Setiap volume 1 cm<sup>3</sup> baterai tipe litium mempunyai kapasitas penyimpanan energi sekitar 2800 Joule, yang berarti dapat mensuplai beban elektrik rata-rata sekitar 100μW dalam waktu mendekati setahun atau tepatnya sekitar 324 hari. Karakteristik yang unik dari generator piezoelektrik ini adalah tegangan keluaran yang relatif rendah [3].

Metode pemanenan energi yang diberi nama *direct effect piezoelectric* menjamin dapat memberikan daya perangkat pembangkit alternatif. Pada percobaan empirisnya, daya listrik 33,84mW diperoleh dari energi yang tersimpan dalam kapasitor 470μF dengan resistor beban 10,4 MΩ pada frekuensi operasi yang rendah dari 2,5Hz selama 25 detik. Efektivitas tenaga listrik ini untuk mengisi penuh baterai NiMH hanya membutuhkan 30 menit. Ayunan vibrasi yang lebih besar dan frekuensi yang lebih tinggi dari transduser piezoelektrik keramik unimorph memberikan lebih banyak energi untuk menghasilkan daya listrik. Jika menggunakan operasi frekuensi yang lebih rendah yakni 1 Hz, hasilnya tidak ada baterai yang dapat terisi setelah diisi selama 15 jam. Percobaan menunjukkan bahwa dibutuhkan 30 menit untuk mengisi penuh baterai NiMH 1,2V 1800mAh di frekuensi operasi 2,5Hz. Pengisian pada kapasitor 100μF dan 470μF yakni 150 detik dan 330 detik serta dibutuhkan lebih dari 48 jam untuk mengisi baterai litium-ion 3,7V 1200mAh [4].

## 2. Pengukuran Komponen Pemanen Energi

Penelitian empiris komponen dasar penyusun sistem pemanen energi dilakukan dengan pengukuran karakteristik diode, waktu penyimpanan energi pada SC, konsumsi

daya perangkat mikrokontroler dan RF *transceiver* dan karakteristik daya keluaran piezoelektrik.

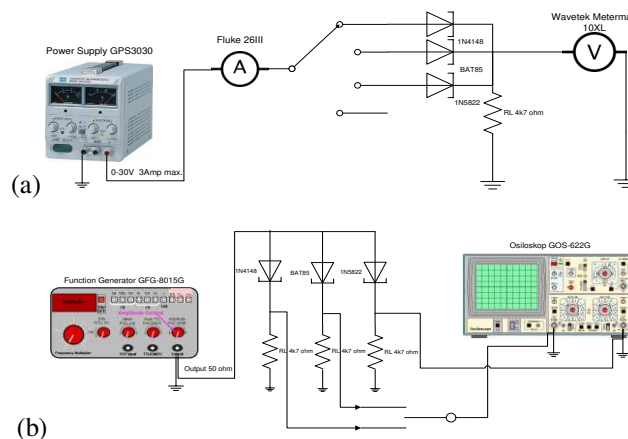
## 2.1 Pengukuran Karakteristik Diode

Pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 1a dan 1b adalah mengukur  $V_f$ ,  $I_f$  dan menghitung efisiensi keluaran serta mengukur amplitudo keluaran penyearah setengah gelombang terhadap frekuensi sinyal sinus yang divariasikan untuk mengetahui karakteristik frekuensi operasi setiap diode. Persamaan 1 menunjukkan rumus efisiensi diode.

$$\eta = \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% = \left( \frac{V_{RL} \cdot I_{RL}}{V_{in} \cdot I_{in}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

dimana:

$\eta$	= efisiensi (%)
$P_{out}$	= daya beban (Watt)
$P_{in}$	= daya total catu daya (Watt)
$V_{RL}$	= tegangan beban RL (Volt)
$I_{RL}$	= arus beban RL (Ampere)
$V_{in}$	= tegangan masukan (Volt)
$I_{in}$	= arus catu daya (Ampere)

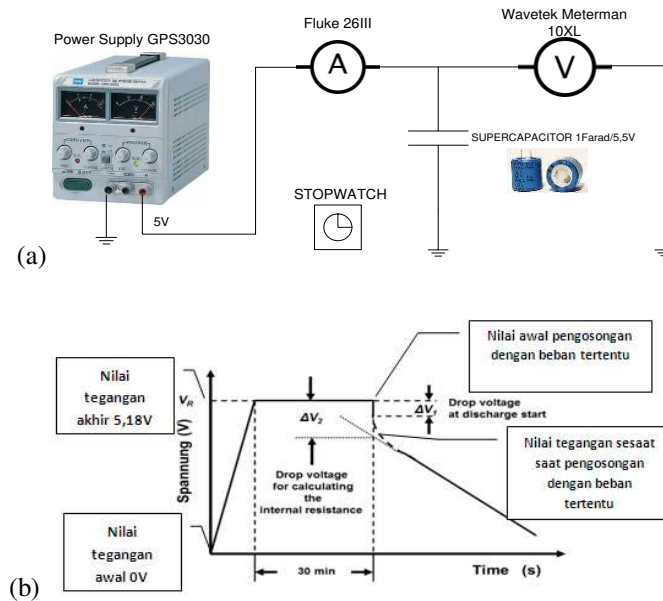


**Gambar 1:** (a). Skema pengujian karakteristik  $V_f$  vs  $I_f$ .  
(b). Skema pengujian karakteristik frekuensi operasi diode.

## 2.2 Pengukuran Superkapasitor

Pengukuran waktu yang diperlukan untuk mengisi hingga penuh sehingga dapat diketahui energi spesifik SC yang ditunjukkan pada Gambar 2a. Resistansi internal SC, daya yang hilang pada SC ditunjukkan pada Gambar 2b. Daya efektifnya yang lebih sesuai untuk aplikasi catu daya sesuai dengan standar IEC 62391-2 dapat dihitung dengan Persamaan 2[5].

$$P_{eff} = \frac{1}{8} \cdot \frac{V^2}{R_i} \quad (2)$$



**Gambar 2:** (a). Uji waktu pengisian SC 1 Farad dari sumber arus.  
(b). Metode pengisian dan pengosongan untuk mencari nilai  $R_i$ .

Energi kapasitor dengan nilai tegangan kapasitor  $V_{DC}$  ketika diberi beban tertentu sesuai dengan Persamaan 3.

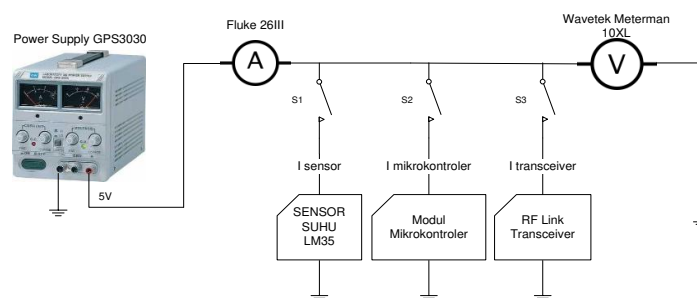
$$W = \frac{1}{2} \cdot C_{DC} \cdot V_{DC}^2 \quad (3)$$

Melalui resistansi internal, arus pengisian dan pengosongan menghasilkan panas sebesar  $P_{loss}$  sesuai dengan Persamaan 4.

$$P_{loss} = R_i \cdot I^2 \quad (4)$$

### 2.3 Pengukuran Konsumsi Daya dan Energi Perangkat Mikrokontroler dan RF Transceiver

Skema pengujian konsumsi energi dari sensor suhu LM35, modul mikrokontroler ATMEGA324A dan RF link transceiver ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3:** Pengukuran konsumsi energi dari sensor suhu LM35 serta Modul Mikrokontroler ATMEGA324A dan RF Link Transceiver

Persamaan 5 menunjukkan penjumlahan konsumsi daya dari masing-masing komponen.

$$P_{\text{total}} = P_{\text{sensor}} + P_{\text{ADC}} + P_{\text{mikrokontroler}} + P_{\text{RF link}} \quad (5)$$

## 2.4 Pengukuran Energi Keluaran Sistem Pemanen Tranduser Piezoelektrik

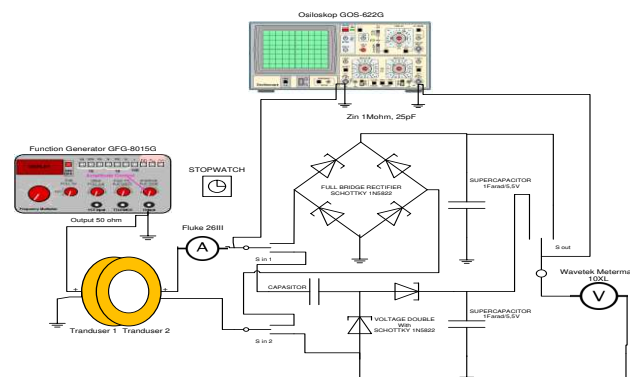
Energi yang dihasilkan oleh tranduser piezoelektrik tidak dapat secara langsung digunakan oleh perangkat elektronis. Energi tersebut harus diubah dengan sebuah antarmuka elektronis yang memastikan kecocokan dengan beban elektrik atau elemen penyimpanan energinya. Rangkaian yang umum digunakan adalah penyearah tegangan bolak-balik ke tegangan dan pengganda tegangan [6]. Untuk menghitung daya keluaran pada rangkaian ini dapat diasumsikan dalam kondisi idealnya yakni  $u$  (perpindahan mekanis) adalah murni sinusoidal dan  $V$ , tegangan rangkaian terbuka (*open circuit*) juga sinusoidal. Tetapi, saat tegangan keluaran tranduser piezoelektrik lebih kecil daripada tegangan kapasitor atau  $V_{\text{DC}}$ , diode masuk keadaan *reverse* sehingga tidak ada arus yang mengalir dan pengisian kapasitor berhenti. Arus dibagi menjadi dua bagian yakni pada pengisian kapasitor dan ke beban lain yang terpasang. Energi yang dihasilkan atau dilambangkan  $E$ , pada periode  $T$  dapat diperkirakan dengan menghitung perkalian dari  $V$  dan  $I$  selama periode tersebut. Daya dapat diperoleh dengan pembagian energi ( $E$ ) terhadap periode ( $T$ ).

$$P = \frac{4\alpha^2 U^2 \omega^2 R_L}{(2R_L C_0 \omega + \pi)^2} \quad (6)$$

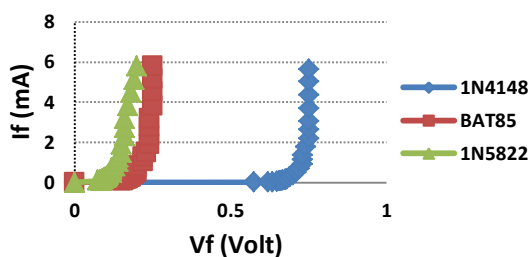
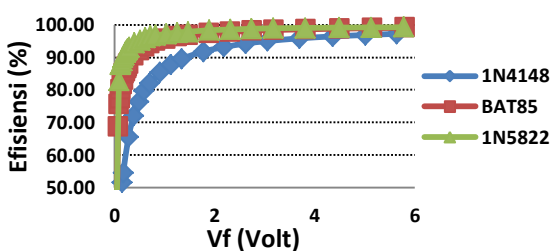
Daya  $P$  dari tranduser piezoelektrik juga dapat didapat dari hasil percobaan pengukuran tegangan  $V_{\text{DC}}$  dan nilai resistor  $R_L$  seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 7.

$$P = \frac{V_{\text{DC}}^2}{R_L} \quad (7)$$

Pengukuran lama waktu pengisian SC dengan penyearah gelombang penuh dan pengganda tegangan ditunjukkan pada skema Gambar 4.



**Gambar 4:** Pengukuran waktu pengisian SC dengan penyearah gelombang penuh dan pengganda tegangan

Gambar 5: Grafik pengujian  $V_f$  vs  $I_f$  diodeGambar 6: Grafik pengujian  $V_f$  vs efisiensi diode

### 3. Hasil Pengujian dan Analisis

Hasil pengujian kemudian digrafikkan menjadi 2 buah grafik yakni grafik pengujian  $V_f$  vs  $I_f$  dan grafik pengujian  $I_f$  versus efisiensi diode. Jangkah arus yang diberikan adalah 0-6 mA dan tegangan catunya adalah 0-27V. Grafik pada Gambar 5 menunjukkan keistimewaan karakteristik pada diode BAT85 dan 1N5822 yakni  $V_f$  yang sangat rendah maksimal sebesar 0,25 Volt untuk arus diode orde mA.

Diode komputer 1N4148 memiliki  $V_f$  cukup tinggi yakni 0,7 Volt dan untuk pemberian arus  $V_f$  di bawah 0,5 Volt, diode belum mulai aktif. Pada grafik pengujian  $V_f$  versus efisiensi pada Gambar 6 menunjukkan efisiensi diode schottky sangat tinggi dari pemberian  $V_f$  yang sangat rendah. Dari hasil perbandingan antara BAT85 dan 1N5822, 1N5822 mempunyai kelebihan efisiensinya lebih tinggi dan  $V_f$  lebih rendah. Hasil pengujian frekuensi operasi dapat diketahui jangkah frekuensi 0-100kHz untuk diode 1N4148 dan BAT85, sinyal sinus keluaran yang dihasilkan baik. Untuk ketiga diode, sinyal sinus keluaran tak terdistorsi maksimal pada 1,3MHz untuk 1N4148, 526kHz untuk BAT85 dan 42kHz untuk 1N5822. Efisiensi diode 1N4148 untuk sinyal masukan 2Vpp hanya 20%, sedangkan untuk BAT85 dan 1N5822 masing-masing sebesar 70% dan 80%.

Rerata waktu pengisian SC 1 Farad untuk sumber arus DC konstan 10,17 dan 102mA adalah 495,9 dan 48,8 sekon. Dari hasil percobaan diketahui ralat antara teoritis dengan riil sebesar 2,6% dan 3,9% untuk pengisian dengan arus awal 10,17mA dan 102mA sesuai dengan Tabel 2. Resistansi DC internal dari SC dapat dihitung dengan melakukan percobaan terlebih dahulu mencari nilai tegangan drop ( $\Delta V_2$ ) saat SC dibebani dengan nilai tertentu sesuai dengan Gambar 2a. Daya efektifnya sesuai dengan Persamaan 2 adalah sebesar 260mWatt. Sedangkan energi kapasitor dengan nilai tegangan kapasitor  $V_{DC}$  sebesar 3,34V ketika ditarik arus sebesar 278mA sesuai dengan Persamaan 3 adalah sebesar 5,58 Joule dengan  $P_{loss}$  sesuai dengan Persamaan 4 adalah 0,93 Watt. Pengujian waktu pengisian SC terhadap frekuensi sinyal masukan dari 10, 100, 1k dan 10kHz didapatkan kesimpulan bahwa waktu pengisian untuk frekuensi tersebut adalah mendekati sama.

Tabel 2: Pengukuran Pengisian SC dengan Sumber Arus

U Min (V)	U Charge (V)	I (mA)	Rerata waktu pengisian riil (sekon)	Waktu pengisian teoritis (sekon)
				$C \cdot (U_{charge} - U_{min})$
0	5,18	10,17	495,9	509,34
0	5,18	102	48,8	50,78

**Tabel 3:** Pengukuran Konsumsi Energi Perangkat

Komponen yang aktif	Pengukuran		Daya (mW)	Energi (mJ)	
	Teg. (V)	Arus (mA)		t=1s	(10bit)--> t=1ms
Sensor LM35 (beban R 100kohm)	5,01	0,063	0,31	0,31	0,00031
Sensor LM35 + Modul MEGA324	4,96	15	74,4	74,4	0,0744
Sensor LM35 + ADC + Modul MEGA324	4,96	17	84,32	84,32	0,08432
Sensor LM35 + ADC + Modul MEGA324 + RF link	4,96	110	545,6	545,6	0,5456

**Tabel 4:** Konsumen Energi untuk Frekuensi 1, 5 dan 10Hz

Daya saat RF link active	545,6	mWatt
Daya saat RF link sleep	74,4	mWatt
Waktu pengiriman 10 bit	1,0416	Ms

Frek. Kirim (Hz)	t total kirim (ms)	Kons. Daya RF link active (mW)	T total RF link sleep (ms)	Kons. Daya RF link sleep (mW)	Kons. Energi dalam t 1 s (mJ)
1	1,04	545,6	998,96	74,32	74,81
5	5,21	2728	994,79	74,012	87,83
10	10,42	5456	989,58	73,62	129,69

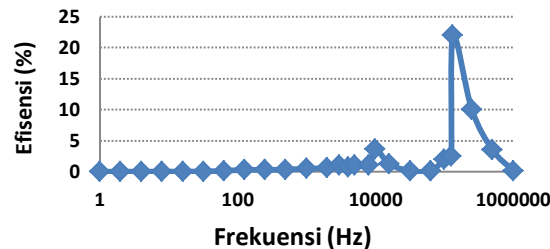
Pengukuran konsumsi daya dan energi perangkat sensor suhu, mikrokontroler dan modul RF ditunjukkan pada Tabel 3. Konsumsi daya keseluruhan dibagi menjadi beberapa komponen, yakni daya sensor 0,31mW, daya modul mikrokontroler 74,1mW, ADC internal perkanal adalah 9,92mW, RF link 461,28mW, sesuai Persamaan 5.

$$P_{\text{total}} = (0,3 + 9,92 + 74,1 + 461,28)\text{mW} = 545,6 \text{ mW}$$

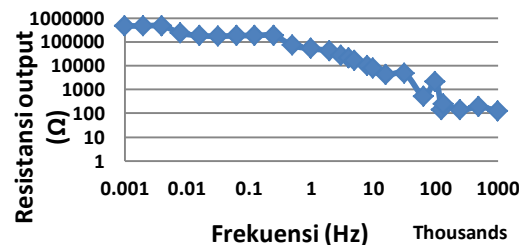
Data yang dikirimkan adalah data sensor LM35 dengan lebar 8 bit serta bit start dan stop. Kecepatan pengiriman adalah 9600 bps sehingga 1 bit membutuhkan waktu 104,167  $\mu\text{s}$ . Perhitungan konsumsi energi untuk pengiriman data dengan frekuensi 1, 5 dan 10 Hz ditunjukkan pada Tabel 4. Pada tabel ditunjukkan bahwa daya yang tidak signifikan menurun jika frekuensi pengiriman data diperkecil adalah konsumsi daya perangkat saat RF link *transceiver* KYL1020U dalam mode *sleep*.

Tranduser piezoelektrik yang digunakan mempunyai beberapa titik frekuensi dimana konversi energinya tertinggi dibanding frekuensi lainnya. Titik-titik frekuensi tersebut adalah 3kHz, 10kHz, 133kHz dan 250kHz dimana efisiensinya menurut grafik Gambar 7 paling besar di frekuensi 133kHz yakni 22%. Hasil pengukuran resistansi keluaran tranduser terhadap frekuensi yang diberikan menunjukkan frekuensi semakin meningkat, resistansi keluarannya semakin menurun ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil yang diperoleh adalah untuk rangkaian penyearah gelombang penuh lebih cepat 2,5 kali dibanding rangkaian pengganda tegangan, karena meningkatnya impedansi keluaran

sistem penganda tegangan. Pengisian dilakukan oleh sumber konversi mekanis ke listrik oleh transduser piezoelektrik dari saat tegangan SC 0 hingga 1 Volt. Pengisian dengan penyearah gelombang penuh membutuhkan waktu 1370 sekon dengan arus 26,6mA dan penganda tegangan membutuhkan waktu 3450 sekon dengan arus 10,6mA.



**Gambar 7:** Efisiensi konversi energi dari transduser vs frekuensi



**Gambar 8:** Grafik resistansi keluaran transduser terhadap frekuensi

#### 4. Kesimpulan

Sistem pemanen energi dengan piezoelektrik untuk perangkat elektronika daya rendah meliputi sistem penyearah untuk mengubah arus bolak-balik dari transduser piezoelektrik yang paling cocok dan tinggi efisiensinya lebih dari 85% pada ratusan mVolt hingga Volt adalah diode schottky. Schottky yang digunakan adalah 1N5822. Super kapasitor yang digunakan berkapasitas 1 Farad/5,5V cocok untuk menyimpan energi untuk sistem pemanen energi tanpa baterai khususnya untuk perangkat elektronika daya. Lama waktu pengisian kapasitor tidak tergantung frekuensi sumber arus bolak-balik yang diberikan tetapi dari besarnya arus.

RF link *transceiver* yang digunakan membutuhkan daya yang besar saat melakukan transmisi yakni sekitar 460mW sehingga belum sesuai dengan persyaratan sebuah WSN. Kebutuhan energi perangkat elektronika dengan sensor suhu dan RF link *transceiver* yang diuji masih cukup besar yakni 74,8mJoule/sekon saat kondisi *sleep*. Frekuensi kirim semakin tinggi membutuhkan energi yang semakin meningkat juga. Pada pengujian dengan frekuensi 1,5 dan 10 Hz, frekuensi 1 Hz membutuhkan energi paling kecil. Efisiensi transduser piezoelektrik paling tinggi pada frekuensi 10kHz dan 133kHz yakni 3,6% dan 22%. Resistansi keluaran transduser menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi.



---

**Referensi**

- [1] "Innowattech - Technology." [Online]. Available: <http://www.innowattech.co.il/technology.aspx>.
- [2] S. Maurya, P. Suman, and M. Radhakrishna, "A Review of Energy Harvesting Techniques for WSN," *Indian Institute of Information Technology-Allahabad, India*.
- [3] Y. K. Ramadass and A. P. Chandrakasan, "An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 1, pp. 189–204, Jan. 2010.
- [4] Y. Ting, G. Hariyanto, B. K. Hou, and C. Y. Huang, "Evaluation of Energy Harvesting by using Piezoelectric Unimorph Ceramics," *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 778–783, 2009.
- [5] "Supercapacitor - Wikipedia, the free encyclopedia." [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>.
- [6] J. Qiu, H. Jiang, H. Ji, and K. Zhu, "Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits," *Frontiers of Mechanical Engineering in China, Higher Education Press and Springer-Verlag*, vol. 4, no. 2, pp. 153–159, Mar. 2009.